

ную среду, в первую очередь, топливно-энергетического комплекса. В энергетике уменьшение ущерба природе должно осуществляться как за счёт энергосбережения, так и за счёт повышения экологической чистоты энергетических технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон РФ от 5 марта 1992 г. № 2446-1 «О безопасности».
2. Бушуев В.В., Воропай Н.И., Мастепанов А.И. и др. Энергетическая безопасность России. – Новосибирск: Наука, 1998. – 302 с.
3. Ушаков В.Я. Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 469 с.
4. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
5. Безруких П.П. Роль возобновляемой энергетики в энергосбережении в мире и России // *Электрика*. – 2004. – № 4. – С. 3–5.
6. Энергетика окружающей среды. 2011. URL: <http://crimean-center.com/?p=288> (дата обращения: 19.09.2011).
7. Ушаков В.Я. Возобновляемая и альтернативная энергетика: ресурсосбережение и защита окружающей среды. – Томск: Изд-во «СибГрафикс», 2011. – 137 с.

*Доложено на пленарном заседании Международной молодёжной конференции «Энергосберегающие технологии», состоявшейся в ТПУ 28–30 июня 2011 г. в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (мероприятия 2.1 – I очередь) в соответствии с государственным контрактом ГК № 14.741.11.0163.*

8. Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050. (Second Edition) OECD/IEA. – Paris, 2008. – 650 p.
9. Твайделл Д., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
10. Роза Р. Магнитогидродинамическое преобразование энергии. – М.: Энергоиздат, 1970. – 250 с.
11. Бойко В.И., Демянук Д.Г., Кошелев Ф.П. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 490 с.
12. Муротов В.М., Троянов М.Ф., Шмелёв А.М. Использование тория в ядерных реакторах. – М.: Энергоиздат, 1983. – 96 с.
13. Гуськов С.Ю. Прямое зажигание мишеней термоядерного синтеза потоком ионов лазерной плазмы // *Квантовая электроника*. – 2001. – № 31 (10). – С. 885–890.

*Поступила 19.09.2011 г.*

УДК 620.91.004

## ЗАМЫКАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В ПРЕОДОЛЕНИИ МИРОВОГО ДЕФИЦИТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ. Ч. 1. СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Г.И. Полтараков\*, Р.Е. Водянкин, А.В. Кузьмин

\*Институт ядерной энергетики (филиал) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, г. Сосновый Бор  
Томский политехнический университет  
E-mail: [kuzminav@tpu.ru](mailto:kuzminav@tpu.ru)

*Приводятся данные экспертных оценок глобального потребления энергии на душу населения, структуры и динамики изменения мирового энергопотребления. Анализ структуры мирового обеспечения энергоресурсов показывает их нарастающий дефицит.*

#### Ключевые слова:

*Глобальное потребление энергии, структура энергоресурсов, дефицит энергоресурсов.*

#### Key words:

*Global energy consumption, structure of energy resources, shortage of energy resources.*

Анализ глобального потребления энергии на душу населения, структуры и динамики изменения мирового энергопотребления и структуры обеспечения энергоресурсов показывает их нарастающий дефицит.

На протяжении всей истории своего развития человечество потребляло энергию, и потребности в ней постоянно росли. Так, за последние 50 лет при удвоении населения планеты, потребление энергии увеличилось в 4 раза [1]. Несмотря на то, что начиная с 1980 г. энергопотребление на душу населения остаётся практически неизменным на уровне 2,3 т. условного топлива на человека

с точностью  $\pm 3\%$  (рис. 1), динамика роста общего энергопотребления [2] остаётся достаточно высокой (рис. 2).

Этот рост определяется тремя основными факторами: развитием мировой экономики, ростом населения и стремлением к более равномерному распределению душевого энергопотребления между странами [3].

Предполагается, что экономический рост до 2025 г. будет достаточно высоким – среднегодовой прирост мирового ВВП составит 4,3 % [4]. Во второй четверти (2025–2050 гг.) экономический рост замедлится и прежде всего из-за замедления

темпов роста населения до 2,8 %. К 2025 г. демографы предсказывают рост населения на уровне 28...30 % от нынешнего количества с последующим уменьшением прироста вдвое каждые 25 лет [2]. Таким образом, к 2050 г. население земного шара достигнет 9,4 млрд человек. Стабилизация численности ожидается только к 2100 г. на уровне 10,4–11 млрд человек [5]. Выравнивание душевого энергопотребления так же даст ощутимый вклад в рост общего энергопотребления, так как на данный момент этот показатель различается между странами в 25...30 раз. Глобальное потребление энергии, как минимум, удвоится к 2050 г., даже если исходить из минимальных темпов его роста [3]. Естественно, возрастающие потребности в энергии обуславливают и рост потребностей в энергоресурсах.

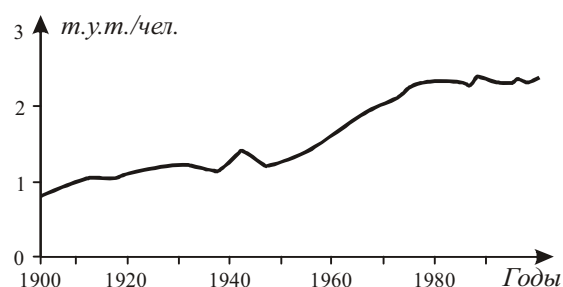


Рис. 1. Динамика изменения мирового потребления энергии на душу населения

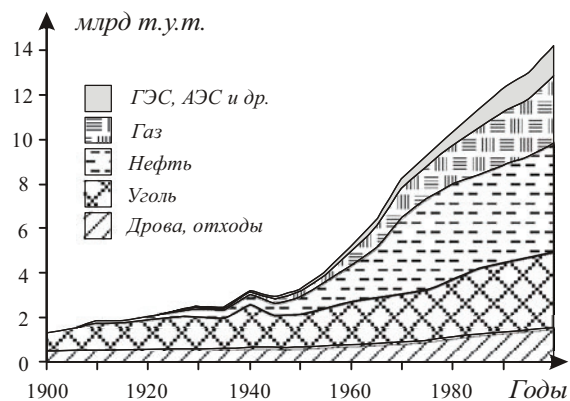


Рис. 2. Динамика изменения мирового потребления энергии

На рис. 3 представлена эволюция структуры потребления энергии за прошедший век [2]. Наблюдался устойчивый рост долевого участия в структуре энергопотребления газа, атомной энергии и новых возобновляемых источников энергии, практически постоянную долю занимала гидроэнергетика, снижалось доленое участие угля и дров. Нефть в 60-е гг. прошлого века стала доминирующей составляющей структуры мирового потребления энергии, в середине 70-х гг. достигла максимума, и затем её участие стало постепенно снижаться.

Современная структура мирового энергопотребления за счет коммерческих ресурсов выглядит следующим образом (рис. 4): на нефть приходится 35,6 %, природный газ – 23,8 %, уголь – 28,3 %, гидроэнергия – 6,4 %, атомная энергия – 5,6 % [6].

Биотопливо – древесина, торф, биомасса, отходы, а также энергия солнца, ветра, геотермальные источники и т. д., по оценке Всемирного банка, составляют дополнительно около 10 %.

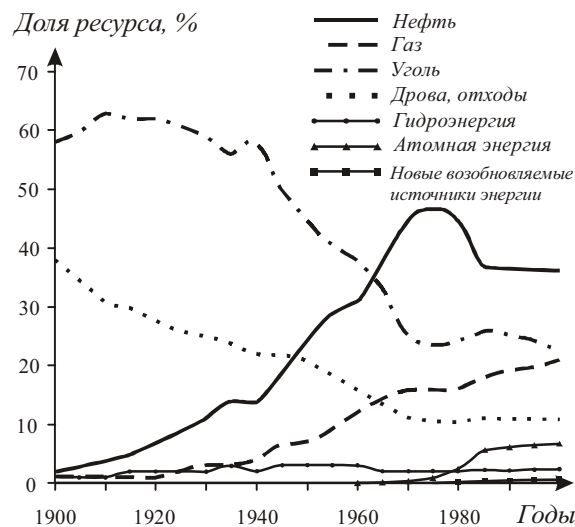


Рис. 3. Эволюция структуры мирового потребления энергии

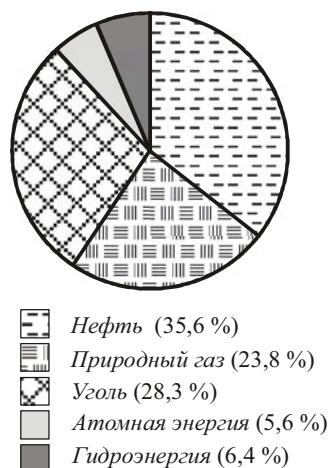


Рис. 4. Современная структура мирового потребления энергии

Проанализируем, сколько может просуществовать данная структура, и приемлема ли она в будущем.

Как видно из представленных данных, ключевую роль в обеспечении мировой экономики необходимыми энергоресурсами играют исчерпаемые, невозобновляемые источники. Их запасы со временем уменьшаются. Так, ресурсы нефти достаточны для эксплуатации залежей в течение примерно 41,6 лет, газа – 60,3 лет, угля – 133 лет [7]. Приемлемого по цене урана (менее 130 USD за кг) хватит только на 85 лет [8]. Очевидно, что данные прогнозы носят лишь вероятностный характер и ежегодно пересматриваются с учётом поступления новых данных и возможностей использования новых технологий. Тем не менее, неоспорим факт ограниченности энергоресурсов в обозримой перспективе. Истощаемость запасов нефти наглядно продемонстрирована на рис. 5 [9].

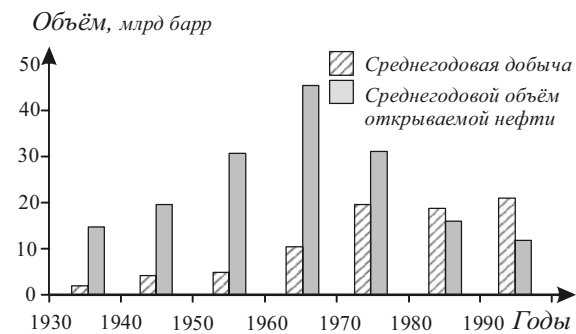


Рис. 5. Прирост сырьевой базы и динамика мировой добычи нефти

В связи с быстрым истощением существующих запасов, удорожанием разведки новых месторождений, добычи, транспорта и переработки их стоимость возрастает из года в год. Так, себестоимость добычи нефти и газа с 2000 по 2007 г. выросла на 67 % [10]. Рост стоимости основных энергоресурсов с 1991 по 2006 гг. представлен на рис. 6 [11].



Рис. 6. Динамика цен на основные энергоресурсы

Неисчерпаемые и возобновляемые источники энергии не смогут в полной мере покрыть потребности человечества. Широкомасштабное использование гидроэнергетики имеет свои экологические и экономические ограничения, а возобновляемые источники энергии из-за крайне низкой и неравномерной плотности её потока не могут экономически конкурировать с тепловыми машинами в «большой» энергетике [12]. Управляемый термоядерный синтез очень сложен и дорог, и, по мнению ряда экспертов, имеет множество нерешённых проблем, что до сих пор ставит под сомнение саму возможность его промышленного использования [13, 14]. Таким образом, становится очевидным нарастающий мировой дефицит энергоресурсов.

Увеличение потенциала используемых углеводородных ресурсов и развитие энергосберегающих технологий, безусловно, будет способствовать более рациональному и экономному их использованию, но не изменит сложившейся ситуации в целом.

Возможность разрешения проблемы надвигающегося «энергетического голода» связывают с атомной энергетикой, а именно, с её сырьевой базой,

действительный потенциал которой на сегодняшний день практически не используется.

Связано это, прежде всего, с тем, что доля пригодного для деления в ядерных реакторах  $^{235}\text{U}$  в природном уране составляет всего 0,72 %, а остальная часть практически приходится на изотоп  $^{238}\text{U}$ . Если ядра  $^{235}\text{U}$  способны делиться нейтронами всех энергий, рождающимися в активной зоне ядерного реактора, то  $^{238}\text{U}$  — только быстрыми нейтронами с энергией больше некоторого порогового значения, примерно равного 0,8...1,3 МэВ.

Вероятность деления ядер  $^{235}\text{U}$  имеет наибольшее значение в тепловой области энергий нейтронов  $< 0,2$  эВ, что позволяет при небольшом обогащении топлива по изотопу  $^{235}\text{U} \leq 5$  % подобрать материалы активной зоны с малыми сечениями радиационного захвата, способными по другим физическим характеристикам обеспечить надёжную работу реактора. Изотоп урана  $^{238}\text{U}$  в резонансной области энергий от 0,2 до 1000 эВ имеет весьма высокую вероятность реакции радиационного захвата нейтрона, которая приводит к образованию вторичного ядерного горючего  $^{239}\text{Pu}$  ( $^{241}\text{Pu}$ ). Этот процесс образования нового горючего в реакторе на тепловых нейтронах оценивается коэффициентом воспроизводства и на существующих тепловых реакторах типа ВВЭР-1000 составляет  $\approx 0,6$ . Получение дополнительного ядерного горючего обеспечивает примерно 1/3 энерговыработки атомной станции за микрокампанию. Особенности физики быстрых реакторов позволяют обеспечить более существенное воспроизводство с коэффициентом воспроизводства  $\geq 1$ .

В настоящее время число реакторов на тепловых нейтронах, требующих обогащенного до 5 % ядерного горючего, насчитывается в мире несколько сотен, в то время как быстрых энергетических реакторов единицы. В результате частичного извлечения  $^{235}\text{U}$  из природного урана получают отвалный уран, который можно использовать только в зонах воспроизводства быстрых реакторов.

В соответствии с концепцией замкнутого ядерного топливного цикла отработавшие в ядерном реакторе тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) после выдержки во временном хранилище перевозятся в специальных контейнерах на перерабатывающий завод для химической переработки. В результате переработки извлекаются делящиеся нуклиды, которые повторно используются для производства новых ТВЭЛов. При этом только небольшая часть делящегося материала (примерно 1 %) в процессе химической переработки и изготовления ТВЭЛов теряется вместе с радиоактивными отходами. Такое повторное использование топлива (рециклинг) должно способствовать более полному использованию ядерного топлива и соответственно уменьшать расход природного урана.

Идея о более полном использовании  $^{238}\text{U}$  далеко не нова, и была сформулирована Э. Ферми ещё в 1944 г. [14]. Практическая реализация этой идеи может существенно расширить базу энергоресурсов. По оценкам [8], если вовлечь в ядерный то-

пливный цикл  $^{238}\text{U}$ , то только имеющиеся запасы урана позволят обеспечить человечество энергией на несколько тысяч лет.

#### Выводы

Показано, что оптимальным путем разрешения проблемы надвигающегося «энергетического голода»

является замыкание ядерного топливного цикла в атомной энергетике, что позволит значительно расширить использование её сырьевой базы.

Проблема замыкания ядерного топливного цикла уже сейчас становится глобальной и скорей всего потребует широкого международного участия в её разрешении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.А., Фортов В.Е. Тенденции развития мировой энергетики и энергетическая стратегия России // Вестник РАН. — 2004. — № 3. — С. 195–208.
2. Макаров А.А. Энергия и энергетика будущего: Доклад на Российском энергетическом форуме. 2005. URL: <http://www.eri-ras.ru/papers/2005/energy.pdf> (дата обращения: 11.03.2011).
3. Хлебников В.В. Топливо-энергетический комплекс России в XXI веке. Стратегия развития энергетического будущего. — М.: Научтехлитиздат, 2006. — 331 с.
4. Клинов В.Г. Мировая экономика: прогноз до 2050 г. // Вопросы экономики. — 2008. — № 5. — С. 62–79.
5. Синяк Ю.В., Бесчинский А.А. Возможная роль российского природного газа в социально-экономическом развитии Евразийского пространства в XXI веке // Проблемы прогнозирования. — 2003. — № 5. — С. 55–73.
6. Finley M. Volatility and Structural Change: BP Statistical Review of World Energy. June 2009. 2009. URL: <http://www.usaee.org/usaee2009/submissions/presentations/Finley.pdf> (дата обращения: 11.03.2011).
7. Иванов А.С., Матвеев И.Е. Состояние мирового энергетического рынка на рубеже 2007–2008 годов // Мировое и национальное хозяйство. — 2008. — № 3 (6). — С. 1–6.
8. Uranium 2005: Resources, Production and Demand. 2006. URL: <http://www.oecd-neo.org/ndd/reports/2006/uranium2005-russian.pdf> (дата обращения: 11.03.2011).
9. Митрова Т.А. Тенденции и риски развития мировой энергетики // Экономическое обозрение. — 2007. — № 7. — С. 8–15.
10. Нефть России: Новости 13.02.2007. 2007. URL: <http://www.oil-ru.com> (дата обращения: 11.03.2011).
11. Ruhl C. BP Statistical Review of World Energy: BP Statistical Review of World Energy. London. 12 June 2007. 2007. URL: <http://www.bakerinstitute.netfu.rice.edu/.../bpstatisticalreview/Energy-in-Perspective-bp-sustainability-report-2007-christof-ruhl-speech-and-slides.pdf> (дата обращения: 11.03.2011).
12. Адамов Е.О. Белая книга ядерной энергетики. — М.: ГУП НИКИЭТ, 1998. — 355 с.
13. Бойко В.И. Управляемый термоядерный синтез и проблемы инерциального термоядерного синтеза // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 6. — С. 97–104.
14. Орлов В.В. К публикации выступления академика А.П. Александрова в ИЯИ АН УССР 19 мая 1978 г. // Вопросы истории естествознания и техники. — 2003. — № 2. — С. 22–25.

Поступила 31.01.2011 г.

УДК 621.039.577–027.31

## ЗАМЫКАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В ПРЕОДОЛЕНИИ МИРОВОГО ДЕФИЦИТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ. Ч. 2. ИННОВАЦИОННЫЕ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Г.И. Полтаракон\*, Р.Е. Водянкин, А.В. Кузьмин

\*Институт ядерной энергетики (филиал) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, г. Сосновый Бор  
Томский политехнический университет  
E-mail: kuzminav@tpu.ru

Рассматриваются современное состояние и перспективы замыкания ядерного топливного цикла в атомной энергетике, концепции инновационных ядерно-энергетических систем, которые позволят снять проблему наступающего энергетического голода.

#### Ключевые слова:

Ядерный топливный цикл, инновационные ядерно-энергетические системы, схемы новых реакторов, новые материалы ядерной техники.

#### Key words:

Nuclear fuel cycle, innovation nuclear power systems, circuitry of new reactors, new materials of nuclear engineering.

В настоящее время мировое сообщество реализует следующие стратегические направления: *во-первых*, создание термоядерной энергетики и, *во-вторых*, замыкание ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и освоение критических и сверхкритических параметров в современной атомной энергетике, реализация которых позволит практически решить проблему «топливного голода» [1].

Осуществление управляемого термоядерного синтеза является сложной, дорогостоящей и проблемной задачей. Поэтому это направление реализуется в рамках международного сотрудничества созданием Международного термоядерного экспериментального реактора мощностью 500 МВт, который планируется построить в 2016 г., а первую промышленную термоядерную станцию [2] в 2045–2050 гг.